

влияние на механические характеристики материала гофрированных стенок и полки. Однако в арочном профиле в отличие от прямолинейного вследствие поперечного гофрирования происходит резкое изменение механических свойств материала в нижних углах. Диаграммы деформирования стальных образцов, вырезанных из нижних углов арочных профилей, не имеют площадки текучести. Следует отметить, что при увеличении толщины до 1,5 мм происходит значительное снижение относительного удлинения: равномерно — с 15,4 до 5,7 % и конечного — с 24,3 до 13,5 %. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании, а именно, при выборе марки стали и назначении соответствующих механических характеристик в технических условиях на рассматриваемые конструкции или в проектной документации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрумян Э. Л., Емелин Е. И., Барсков Д. П. Устойчивость оболочек из гофрированных стальных профилей / Промышленное строительство. 1990. № 10. С. 18 – 19.
2. Еремеев П. Г., Киселев Д. Б., Арменский М. Ю., Бурлай С. И. Натурные испытания фрагмента арочного свода из холодногнутых тонколистовых стальных профилей / Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. № 12. С. 5 – 8.

3. Липленко М. А., Айрумян Э. Л. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей / Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 42 – 44.
4. Тришевский И. С., Клепанда В. В. Механические свойства гнутых профилей проката. — Киев: Техника, 1977. — 143 с.
5. ГОСТ 11701–87. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. — М.: Издательство стандартов, 1993. — 10 с.
6. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — М.: Стандартинформ, 2008. — 35 с.

REFERENCES

1. Ayrumyan E. L., Emelin E. I., Barskov D. P. Ustoichivost' obolochek iz gofirovannykh stal'nykh profilei [Stability of corrugated profiles at shells] / Promyshl. Stroit. 1990. N 10. P. 18 – 19 [in Russian].
2. Eremeev P. G., Kiselev D. B., Armenskiy M. Yu., Burlay S. I. Naturnye ispytaniya fragmenta arochnogo svoda iz kholodnogutykh tonkolistovykh stal'nykh profilei [Test of natural fragment of arch roof of cold-formed steel profiles] / Montazh. Spets. Raboty Stroit. 2004. N 12. P. 5 – 8 [in Russian].
3. Liplenko M. A., Ayrumyan E. L. Osobennosti raboty beskarkasnykh arochnykh pokrytii iz stal'nykh kholodnogutykh profilei / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2011. N 6. P. 42 – 44 [in Russian].
4. Trishevskii I. S., Klepanda V. V. Mekhanicheskie svoistva gnutyykh profilei prokata [Mechanical properties of cold-formed sections]. — Kiev: Tekhnika, 1977. — 143 p. [in Russian].
5. RF State Standard GOST 11701–87. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie tonkikh listov i lent [Metals. Test method of tensile of thin sheets and strips]. — Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1993. — 10 p. [in Russian].
6. RF State Standard GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie [Metals. Test Methods on Tensile]. — Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2008. — 35 p. [in Russian].

УДК 620.178

СПОСОБ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО ПАРАМЕТРАМ СЛЕДА МАЯТНИКОВОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ¹

© Б. Я. Мокрицкий², Д. А. Пустовалов², В. В. Алтухова², П. А. Саблин²,
Е. Г. Кравченко², М. И. Дворник³, А. В. Зайцев³, С. А. Пячин³

Статья поступила 2 февраля 2015 г.

Предложен способ и получены результаты применения метода маятникового скрайбирования для качественной сравнительной экспресс-оценки физико-механических характеристик инструментальных и других материалов, а также эксплуатационных свойств инструмента, изготовленного из таких материалов. Показано, что существует взаимосвязь между указанными характеристиками и параметрами следа маятникового скрайбирования. Это позволяет существенно упростить и сократить затраты на оценку качества разрабатываемых новых материалов.

Ключевые слова: оценка свойств материалов; экспресс-метод; маятниковое скрайбирование.

Для оценки и сравнения физико-механических характеристик или эксплуатационных свойств нескольких

материалов еще на этапе их разработки обычно применяют метод измерения твердости (и микротвердости), который позволяет получить ее значение лишь для локального объема материала и не дает его интегрированной характеристики. Для таких задач предпочтительней использовать метод скрайбирования (царапания). Методология маятникового скрайбирования для сравнительной оценки обоснована [1 – 4] и

¹ Работа выполнена при поддержке грантов № 2014/68 (код проекта 254) и № 9.251.2014/К Минобрнауки России.

² Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия; e-mail: boris@knastu.ru

³ Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Россия; e-mail: infarest@infarest.khv.ru

предназначена для решения отдельных исследовательских и производственных задач.

В данной работе предложен способ [5] сравнительной оценки упругих и пластических (далее — упругих) свойств разных материалов, в том числе с близким модулем упругости. Он является инструментом для ранжирования (выстраивания в ряд) нескольких сравниваемых материалов по совокупности упругих свойств, в частности, по способности сопротивляться деформированию и разрушению при индентировании методом маятникового скрайбирования.

В производственных и исследовательских условиях часто важно знать не само значение модуля упругости, а то, каким образом соотносятся между собой разные материалы по своим упругим свойствам, какой материал следует предпочесть остальным. В этих случаях важнее представлять, какое место в ряду занимает тот или иной материал по своим упругим свойствам, оцененным в одинаковых (эквивалентных) условиях. И это место желательно определять по какому-то параметру, измеренному в результате взаимодействия индентора с образцом, например, по параметрам следа, получаемого на образце при индентировании. Причем метод индентирования должен воспроизводить условия нагружения, наиболее близкие к эксплуатационным. Так, для материалов инструментального назначения целесообразно скрайбирование (царапание), а именно маятниковое скрайбирование, при котором в материале воспроизводятся условия деформации сжатием, сдвигом и растяжением.

Возможность исследовать протяженные участки материалов методом скрайбирования показана ранее [6]. Скрайбирование образца индентором осуществляли при их взаимном перемещении с образованием сетки следов перемещений. Свойства материала (сопротивляемость деформированию и разрушению) оценивали по результатам измерений повреждения образца в зоне следа скрайбирования. При этом измеряли площади разрушения поверхности образца в ячейках сетки следов и исходили из условия: чем меньше площадь разрушения, тем выше сопротивляемость деформированию и разрушению. Для этого проводили несколько нагружений образца и поворачивали его для образования сетки следов. Это трудоемко, сложно в настройке, требует наличия соответствующих площадок на образце.

Известно [7] применение маятникового скрайбирования для оценки свойств материалов, когда индентор перемещается по дуге качания жесткого маятника. Свойства контролируют с использованием метода акустической эмиссии, а материалы сравнивают (ранжируют) по величине параметра сигналов акустической эмиссии, а именно по спектру частот. Это сложно для реализации и требует лабораторных условий с соответствующим программным обеспечением для обработки и анализа параметров сигналов акустической эмиссии.

Предлагаемое решение [5] упрощает способ прогнозирования физико-механических свойств материалов, а также путем их ранжирования по значению измеряемого параметра, полученного при маятниковом индентировании.

Указанный технический результат достигается за счет:

а) использования эффекта пружинения поверхностного слоя испытываемого материала для воссоздания условий формирования лунки отскока в следе индентирования;

б) установленной взаимосвязи упругих свойств материала с длиной лунки отскока в следе индентирования (с долей длины лунки в общей длине следа маятникового скрайбирования);

в) обнаруженного совпадения тенденций изменения значений модуля упругости разных материалов и изменения такого параметра, как «отношение общей длины следа скрайбирования к длине лунки».

Отмеченные факторы использованы для ранжирования материалов по их физико-механическим (упругим) свойствам, а также для прогнозирования их эксплуатационных свойств.

Таким образом, разработанное решение включает в себя:

однократное нагружение материала индентированием;

индентирование методом маятникового скрайбирования;

измерение результатов скрайбирования по параметрам деформации и разрушения поверхностных слоев материала;

установление взаимосвязи измеренных результатов с исследуемыми физико-механическими свойствами материалов;

прогнозирование эксплуатационных свойств сравниваемых материалов по измеренным результатам скрайбирования.

Первые публикации о возможностях метода маятникового скрайбирования приведены в работах [8 – 10].

При реализации способа использован такой режим маятникового скрайбирования, при котором индентор в начале взаимодействия с образцом формирует на его поверхности лунку. В следе, оставляемом индентором, измеряют общую длину скрайбирования и длину лунки, определяют их соотношение, по которому судят о физико-механических и эксплуатационных свойствах сравниваемых материалов.

На рис. 1 представлена общая схема маятникового скрайбирования.

На рис. 2 показана кинетика (последовательность фотографий) образования лунки в следе маятникового скрайбирования на образцах, поверхность которых была предварительно подвергнута алмазному шлифованию, в виде отдельных фотокадров лунки вдоль ее длины. Видны начало следа с начальной частью

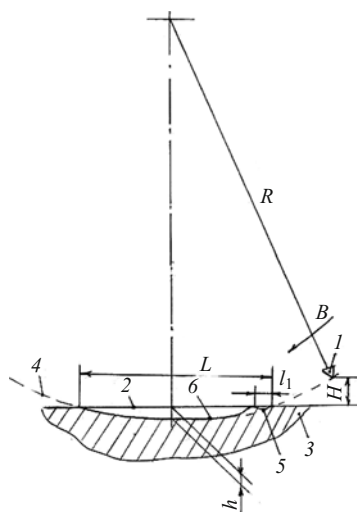


Рис. 1. Схема образования следа при маятниковом скрайбировании: 1 — индентор; 2 — горизонтальная поверхность образца; 3; 4 — траектория движения B индентора 1 за пределами материала образца; 5 — лунка отскока в следе; L — общая длина следа; l_1 — длина лунки; R — радиус качения маятника; B — направление движения маятника; H — высота отклонения индентора от плоскости образца в начале движения B ; h — глубина следа

лунки (рис. 2, а), часть (сверху) той же лунки и начало (снизу) основной части следа скрайбирования (рис. 2, б), начало основной части следа скрайбирования (рис. 2, в) и след скрайбирования (рис. 2, г).

Способ реализуют следующим образом. Индентор 1 выставляют (по его радиусу R и глубине h заглубления в материал образца с учетом массы маятника, формы рабочей части индентора, физико-механических свойств материала образца и высоты H начального положения индентора (маятника)) относительно плоскости 2 образца 3 таким образом, чтобы след взаимодействия индентора с образцом при направлении B движения индентора по дуге 4 его (маятника) качания состоял из лунки 5 отскока и основной части 6 следа. След взаимодействия индентора 1 с образцом наблюдают через микроскоп, имеющий возможность измерять параметры следа. Для большинства конструкционных материалов параметрами лунки могут служить линейные размеры следа скрайбирования.

Таблица 1. Взаимосвязь отношения длины следа скрайбирования к длине лунки с физико-механическими свойствами материалов как последовательность расположения сравниваемых материалов в рандометрических рядах

Марка стали	Последовательность расположения материалов в ряду по возрастанию характеристик				
	модуля упругости	твердости	отношения длины следа скрайбирования к длине лунки	предела прочности на растяжение	износостойкости
Ст3	1	1	1	1	1
45	2	2	2	2	2
30ХГСА	3	3	3	3	3

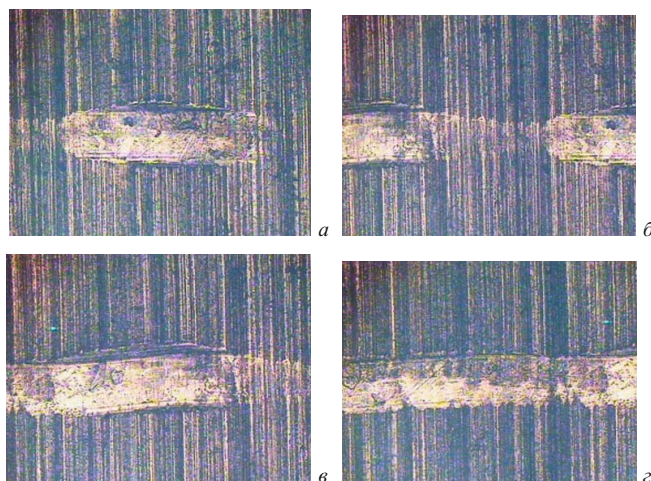


Рис. 2. Кинетика образования лунки в следе маятникового скрайбирования

В данном решении это длина L следа скрайбирования и длина l_1 лунки.

Оценивать сравниваемые материалы, одновременно анализируя значения длины L следа и длины l_1 лунки в следе, не всегда удобно, целесообразнее учесть их комплексно, но в виде одного параметра, например, в виде их отношения L/l_1 .

Приведем примеры реализации способа. Реализовать режимы маятникового скрайбирования, при которых происходит формирование лунки отскока, не сложно. Эти режимы должны обеспечить возможность пружинения испытываемого материала. Для материалов инструментальной группы это удавалось при следующих условиях: при маятнике радиусом $R = 120$ мм, его массе 200 г, начальной высоте индентора $H = 80$ мм и более (с учетом варианта индентора типовой формы) лунка образовывалась при глубине внедрения от 0,2 мм и более для твердого сплава и от 0,5 мм и более для быстрорежущих сталей. (Лунка образуется и при меньших глубинах внедрения, но в этих случаях вычленить ее контуры затруднительно.)

Пример № 1. Отбирали образцы, выполненные из конструкционных сталей марок Ст3, 45 и 30ХГСА. Из справочных данных находили интересные физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства этих материалов. Подбирали для материалов единые условия маятникового скрайбирования. Так, режим скрайбирования с образованием лунки в следе взаимодействия (индентирования) для всех этих сталей обеспечивался при настройке установки на получение глубины внедрения индентора $h = 0,08 - 1,5$ мм. Осуществляли скрайбирование образцов. Для исключения случайных результатов (или их усреднения) проводили по несколько нагружений каждого образца, располагая следы индентирования аналогично. Образцы размещали в микроскопе, измеряли параметры L и l_1 , вычисляли их отношение L/l_1 . Образцы располагали в ряд по значению данного отношения, и результаты сводили в таблицу. Интересовало не столько значе-

ние отношения, сколько связь параметров L и l_1 (и, следовательно, отношения L/l_1) с физико-механическими свойствами материалов, т.е. выявляли корреляцию параметров (отношения L/l_1) и физико-механических свойств материалов. Такая взаимосвязь показана в табл. 1. Числами здесь показаны не значения величин, а место материала в ряду исследуемого параметра, например, из трех сравниваемых материалов на лучшем (третьем) месте находится сталь 30ХГСА, потому что у нее наибольшие значения модуля упругости и числа твердости, при этом меньший уровень повреждений при маятниковом скрайбировании (большее отношение длины следа скрайбирования к длине лунки) и самые высокие эксплуатационные свойства (величины предела прочности и износостойкости). Большее отношение длины следа скрайбирования к длине лунки свидетельствует о том, что у этого материала в сравнении с другим лунка короче и выкрошивание по ее контуру незначительно. Следовательно, чем больше отношение, тем короче лунка при нормальной общей длине следа скрайбирования и выше сопротивляемость материала образованию и росту трещин, а также выше качество материала и его физико-механические характеристики.

Следует отметить, что в примере 1 рассмотрены стали разных групп, имеющие существенно различные значения сравниваемых физико-механических и эксплуатационных свойств.

Правомерность полученных выводов для материалов одной группы применения подтверждена примером № 2.

Пример № 2. Отбирали материалы инструментальной группы, поскольку метод маятникового скрайбирования предназначен, в первую очередь, для оценки свойств инструментальных материалов. Это связано с тем, что маятниковое скрайбирование наиболее близко моделирует реальные условия эксплуатации металлорежущего инструмента.

Сравнивали следующие инструментальные материалы:

а) твердосплавные отечественные сплавы марок ВК8, Т15К6, Т30К4, Т10К8Б и импортный (фирма Mitsubishi) сплав марки TF15;

б) быстрорежущие отечественные стали марок Р18, Р9, Р6М5.

В качестве эксплуатационного свойства принимали период стойкости инструмента до достижения критической величины износа (износ по задней грани, равный 0,8 мм) инструмента в условиях эксплуатации, при которых превалирует хрупкое разрушение (выкрошивание, моделируемое при маятниковом скрайбировании) материала, а именно торцевого фрезерования (режимы резания не указаны, поскольку они не влияют на расположение материала в рандометрическом ряду). Результаты приведены в табл. 2. Здесь числами также показано место материала в ряду исследуемого отношения длины лунки к ее ширине, напри-

мер, из семи сравниваемых материалов на лучшем (седьмом) месте находится сплав TF15, потому что у него лучшие модуль упругости и число твердости (максимальные физико-механические характеристики). При этом у него меньший уровень повреждений (меньшая длина лунки из-за минимального выкрошивания материала) и, соответственно, большая величина отношения длины следа скрайбирования к длине лунки и самые высокие эксплуатационные свойства (максимальный период стойкости).

Анализ данных, приведенных в табл. 1 и 2 для инструментальных и конструкционных материалов, позволяет сделать следующие выводы. С увеличением отношения длины следа скрайбирования к длине лунки повышается уровень физико-механических свойств этих материалов. Среди быстрорежущих сталей Р6М5, Р9, Р18 большее значение этого отношения зафиксировано у стали Р18, имеющей высокие модуль упругости (модуль Юнга) и твердость, а меньшее — у стали Р6М5 с более низкими модулем упругости и твердостью. Из твердых сплавов разных типов ВК и ТК большее значение отношения получено у сплавов типа ТК, имеющих более высокие модуль упругости и твердость, а самые малые значения отношения — у сплава типа ВК с низкими модулем упругости и твердостью. Среди твердых сплавов Т15К6 и Т30К4 одного типа ТК рассматриваемое отношение больше у сплава марки Т15К6, имеющего высокие модуль упругости и твердость, и самое малое — у сплава марки Т30К4 с малыми модулем упругости и твердостью. Самое низкое значение отношения зафиксировано у стали Ст3, имеющей наименьшие модуль упругости (модуль Юнга) и твердость, а самое высокое — у стали 30ХГСА с наибольшими модулем упругости и твердостью.

Установленная взаимосвязь свойств материалов и отношения длины следа скрайбирования к длине лунки позволяет ранжировать (выстраивать в рандометрический ряд) материалы по установленной тенденции: чем больше отношение длины следа скрайбирования к длине лунки, тем выше (лучше) физико-меха-

Таблица 2. Последовательность расположения сравниваемых материалов в рандометрических рядах по изменению их свойств и отношения длины следа скрайбирования к длине лунки

Марка инструментального материала	Последовательность расположения материалов в ряду по возрастанию характеристик			
	модуля упругости	твердости	отношения длины следа скрайбирования к длине лунки	периода стойкости инструмента
Р6М5	1	1	1	1
Р9	2	2	2	2
Р18	3	3	3	3
ВК8	4	4	4	4
Т30К4	5	5	5	5
Т15К6	6	6	6	6
TF15	7	7	7	7

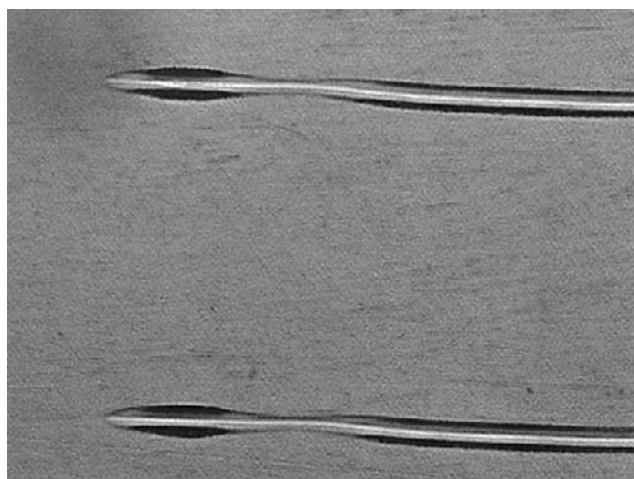


Рис. 3. Фотография образца со следами маятникового скрайбирования (движение маятника слева направо): в начале следов четко выражены лунки, затем ширина следа уменьшается, потом увеличивается

нические свойства материалов. Данная взаимосвязь может быть использована для прогнозирования эксплуатационных свойств материала и изделий, выполненных из сравниваемых материалов (если изделия эксплуатируются в условиях, которые имитируются при маятниковом скрайбировании). Например, по увеличению отношения параметров лунки можно прогнозировать повышение предела прочности, износостойкости (или периода стойкости) изделия.

Таким образом, без проведения длительных и сложных испытаний для определения тех или иных физико-механических свойств (например, модуля упругости — методом деформации стержня растяжением или твердости — методом Роквелла или Виккерса) можно простым измерением двух параметров (общей длины следа и длины лунки) следа маятникового скрайбирования быстро выявить материал, наиболее эффективный из сравниваемых в рандометрическом ряду.

При первых публичных обсуждениях полученных результатов отмечались разные предположения о природе и механизме образования лунки отскока, в том числе высказывались версии о наличии зазоров (люфтов) в приборе для маятникового скрайбирования, большой волнистости поверхности образцов, малой жесткости маятника. Эти версии отрицают фотографии лунок (рис. 3), полученных на отполированных образцах из нержавеющей стали при полной выборке зазоров в конструкции маятника и стола в приборе для маятникового скрайбирования. Можно утверждать, что качество подготовки образцов и значения зазоров не определяют механизм образования лунок. Испытания маятника на жесткость и устойчивость показали, что для образования прогиба маятника нужны усилия, на два порядка превосходящие те, которые имеются при маятниковом скрайбировании. Внешний вид при-



Рис. 4. Внешний вид устройства (справа) для маятникового скрайбирования

бора (устройства) для маятникового скрайбирования показан на рис. 4.

Необходимо отметить, что детально механизмы образования лунки до сих пор не поняты. Она образуется при скрайбировании материалов не всех групп, не при всех глубинах внедрения индентора и т.д. На образование и размер лунки влияет даже изменение массы маятника или изменение угла его отвода от первоначального исходного положения. А более всего на нее влияют упругие свойства исследуемого материала. Для твердосплавных инструментальных материалов пока лишь можно заключить следующее: вероятность образования лунки увеличивается с повышением упругих свойств материала и с уменьшением глубины внедрения индентора при росте величины энергии, запасенной (за счет массы и угла отвода маятника) маятником до взаимодействия с образцом. Очевидно, это связано с разностями скоростей приложения нагрузки и роста напряжений, что может вызвать фронтальный пик волны напряжений впереди движущегося индентора. Форма индентора тоже играет роль. Замена конического индентора на пирамидку приводит к иным результатам. Установка пирамидки гранью или ребром к направлению движения тоже влияет на образование и размеры лунки. У хрупких материалов (режущая керамика, магниты) лунку получить не удалось, у пластичных (свинец) — тоже. Но на алюминии ее получить можно.

На рис. 5 приведены фотографии, которые без привязки к маркам материала и условиям нагружения показывают многообразие механизмов образования лунки (лунка — это часть следа) и остальной части следа скрайбирования. Исследование следов скрайбирования показало, что при значительных глубинах внедрения индентора и высоком уровне запасенной энергии маятника основной контур следа формируется в результате пластической деформации индентором материала образца, но наряду с этим как в основном контуре, так и за его пределами, имеются местные выкрошивания с превалированием хрупкого механизма разрушения. Иными словами, превалирует нормаль-

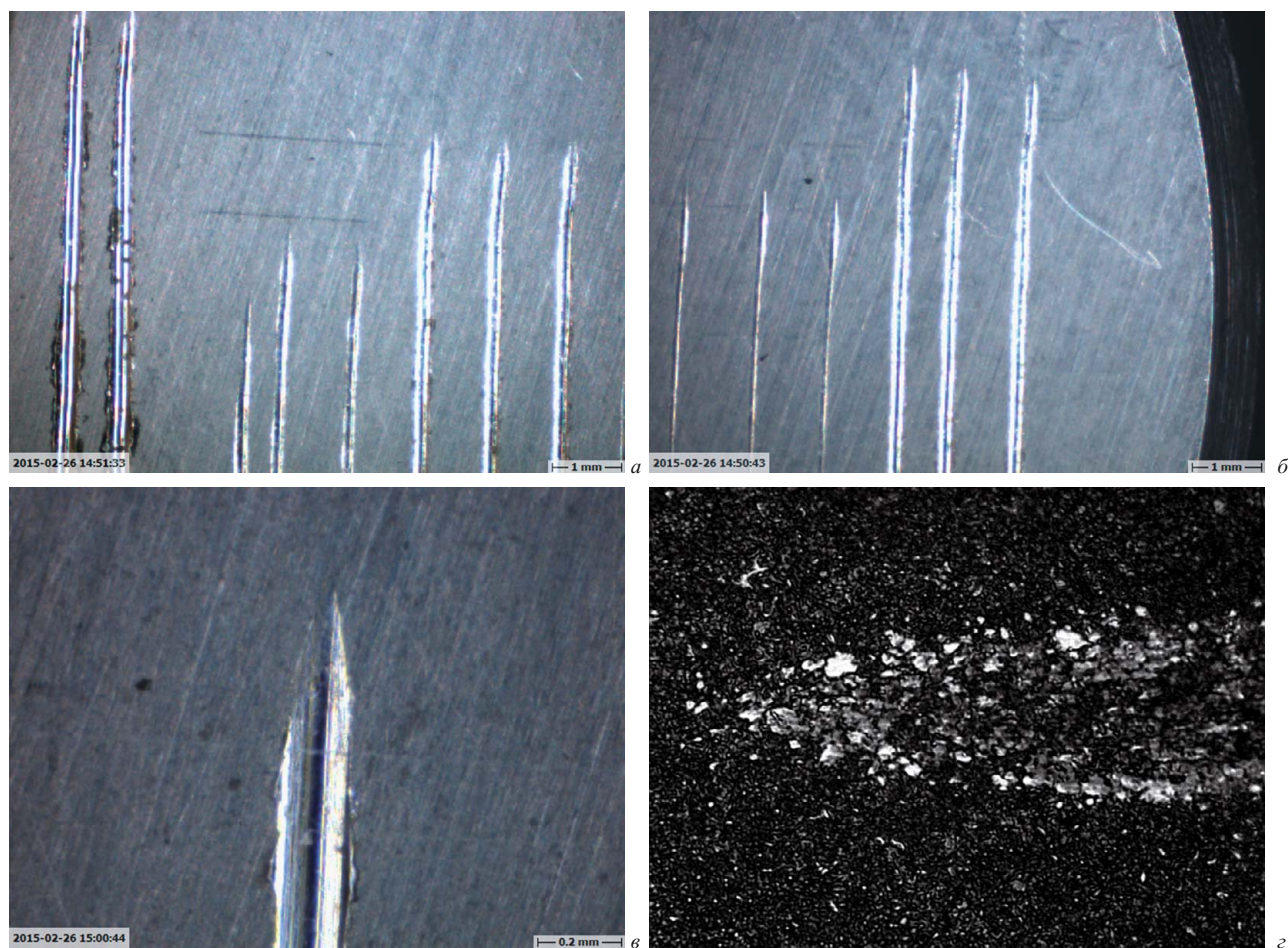


Рис. 5. Фотографии следов скрайбирования: *а* — первые два (слева направо) получены при одинаковых условиях нагружения (высокой запасенной энергии маятника с глубиной внедрения индентора более 0,1 мм), следующие три следа — при меньшей глубине внедрения, причем первый из них — при меньшей массе маятника, три последних следа — при равных условиях и промежуточной глубине внедрения; *б* — три правых следа получены в тех же условиях, что и три правых, представленных на рис. 5, *а*, три левых (в начале следов четко выражены лунки) следа — при глубине, меньшей, чем у трех средних следов на рис. 5, *а*; *в* — начало одной из лунок следа, представленного на рис. 5, *б*; *г* — начало следа скрайбирования на инструментальной черной керамике

ное направление деформации по отношению к направлению движения индентора. При условиях образования лунок (рис. 5, *б*) за пределами основного контура следа выкрошивания практически нет, но происходит образование валков вдоль линии следа за счет выдавливания материала образца за края следа, т.е. имеет место преимущественно тангенциальное направление деформации. В лунке наблюдаются и валок (слева от основного следа), и выкрошивание (справа от основного следа), и чистый сдвиг вдоль площади основной части следа. При скрайбировании хрупкого материала (рис. 5, *г*) происходят только хрупкое и вязкохрупкое разрушения, причем хрупкое разрушение реализовано путем раскола зерен керамики, вязкохрупкое — путем развития разветвленных трещин по границам зерен.

На рис. 6 приведены не только фотографии следов скрайбирования, но и профилограммы следов в поперечном направлении. Вид левого следа на рис. 6, *а* свидетельствует о наличии пластической деформации и хрупкого (по краям следа) механизма разрушения. На рис. 6, *б*, *в* в пределах лунки также присутствуют оба этих механизма, но превалирует пластическое раз-

рушение путем деформации вдоль линии следа, тангенциальная составляющая минимальна. Исследования профилограмм, полученных при использовании алмазной иглы-щупа на электронном профилометре модели TR 200, показали, что при шадящих условиях скрайбирования валки могут быть примерно равными с обеих сторон следа (см. рис. 6, *в*), их высота сопоставима с глубиной следа, ширина валков соответствует трети ширины следа. В более жестких условиях скрайбирования картина может быть иной (см. рис. 6, *г*): чем глубже след, тем выше валки, их равенство по высоте и по ширине с разных сторон следа не обязательно. В пределах валков имеются выкрошивания или отслоения материала образца.

Определить доли хрупкого и вязкого механизмов разрушения оказалось сложно. В некоторой мере это удастся при анализе картин поперечного среза следов скрайбирования за счет исследования поперечной площади следа, но этот вопрос — предмет отдельной работы.

На рис. 7 показаны следы (отпечатки) взаимодействия индентора с одним и тем же образцом, получен-

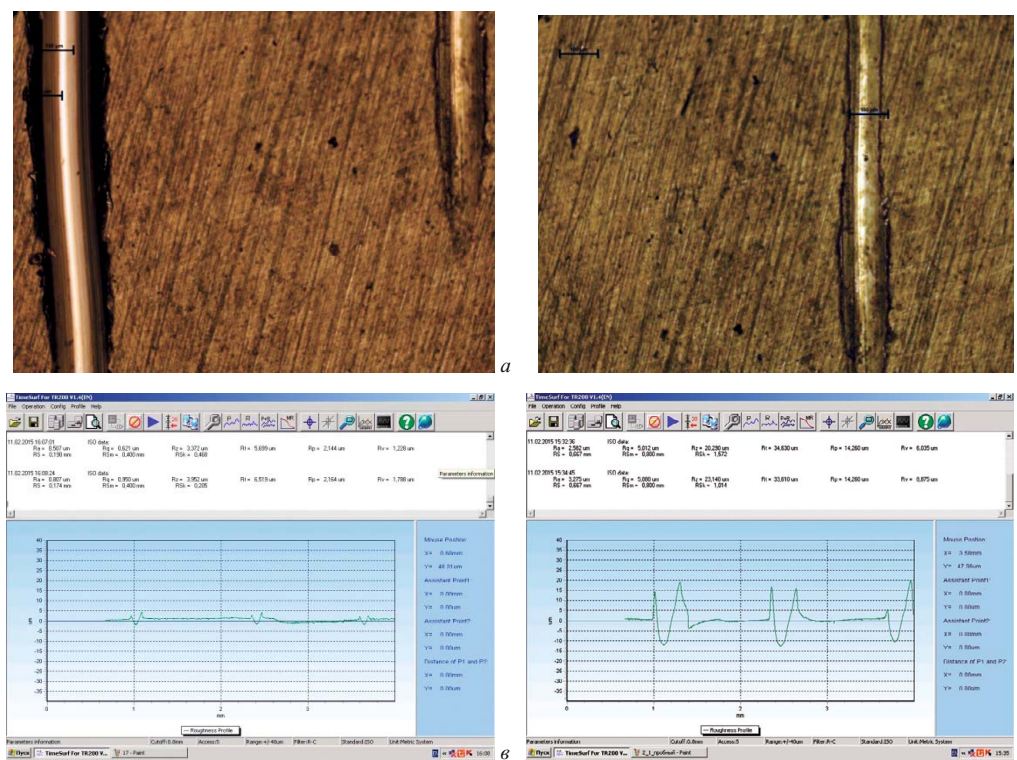


Рис. 6. Фотографии следов скрайбирования (*а, б*) и профилограммы (*в, г*) в поперечном направлении трех следов скрайбирования: *а* — два соседних следа, правый получен при шадящих условиях нагружения, на нем видны элементы начала образования шейки (утонения) между лункой и основной частью следа; *б* — часть фото с рис. 6, *а*, на котором четко видна лунка; *в* — профилограмма трех следов скрайбирования с примерно равными размерами валков по сторонам следов (углубления); *г* — профилограмма других трех следов с разной глубиной следа, высотой и шириной валков

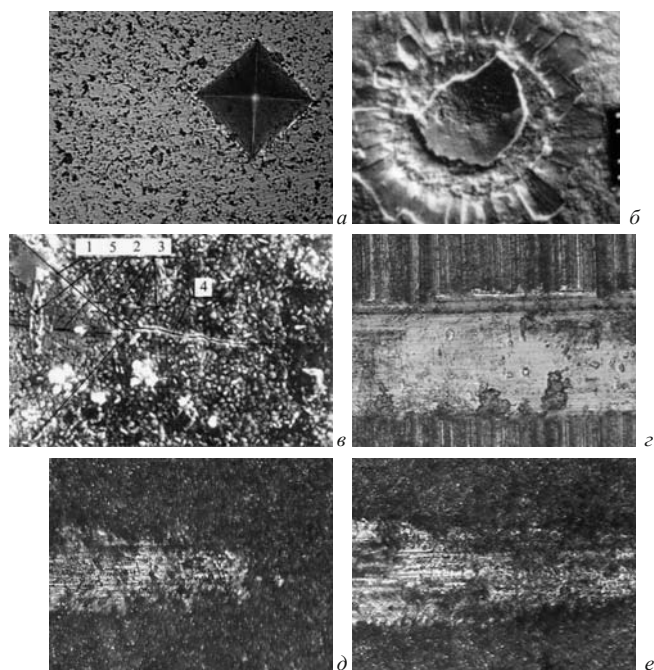


Рис. 7. Картины следов (отпечатков) взаимодействия инденторов с твердосплавным образцом: *а* — от квадратной пирамидки; *б* — от алмазного конуса; *в* — от пирамидки при измерении микротвердости образца с покрытием (1 — контур отпечатка пирамиды; 2 — контур отпечатка перемишки пирамиды; 3 — развитая сетка малых трещин; 4 — магистральная трещина; 5 — отслоившийся объем покрытия); *г–е* — от маятникового скрайбирования (*д* — начало следа без образования лунки; *е* — след с образованием лунки)

ные при разных условиях нагружения, повлекших существенное различие механизмов разрушения материала образца.

Измерения твердости при скоростях нагружения, общепринятых при внедрении конусного алмазного индентора или пирамидки ранобедренной (рис. 7, *а*), приводит лишь к пластической деформации твердосплавного инструментального материала. Хрупкое разрушение отсутствует. Зерна твердой фазы деформируются и ориентируются по плоскостям внутренних граней отпечатка, но не разрушаются. При измерении твердости с использованием алмазного конуса, внедряемого с большой скоростью нагружения, превалирует хрупкое разрушение в тангенциальном направлении (рис. 7, *б*). Когда измеряют микротвердость (рис. 7, *в*), происходит вдавливание объемов, т.е. имеет место пластическая деформация в нормальном направлении и реализуется хрупкое разрушение у вершин отпечатка. При маятниковом скрайбировании (рис. 7, *г–е*) скорости деформации выше, приближены к реальным условиям эксплуатации металлорежущего инструмента, поэтому разрушение носит более сложный характер.

Таким образом, разработано новое решение по применению метода маятникового скрайбирования, которое ориентировано на упрощенное моделирование процесса нагружения исследуемых материалов путем индентирования. Решение позволяет по результатам измерения параметров следа оценивать физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства материалов. Оно может быть использовано как экспресс-оценочный метод.

Применение разработанного решения на конструкционных сталях и инструментальных материалах показало возможность ранжирования сравниваемых материалов по физико-механическим характери-

кам и эксплуатационным свойствам. Это позволяет использовать разработанный метод и как сортировочный для отсеивания материалов с худшими свойствами еще на этапе их разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mokritskii B. Y., Kirichek A. V., Shpilev A. M., Pustovalov D. A., Sablin P. A. Acoustic assessment of tool quality / Russian Engineering Research. 2013. Vol. 33. N 2. P. 74 – 78. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84874899411&partnerID=40&md5=bae6b05bd000d9d82c327cc775924af> (дата обращения: 22.03.2015).
2. Mokritskii B. Ya. Tool Materials for Chemical Machine Building / Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49. N 9 – 10. P. 639 – 640. URL: <http://rd.springer.com/article/10.1007/s10556-014-9810-4/fulltext.html> (дата обращения: 22.03.2015).
3. Пат. 2495412 Российская Федерация, МПК G01N 29/00. Способ сравнительной оценки свойств материалов / Пустовалов Д. А., Мокрицкий Б. Я., Петров В. В., Огилко С. А., Савинковский М. В., Сомин В. И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». — № 2012120101/28; заявл. 15.05.2012; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28.
4. Pustovalov D. A., Mokritskii B. Y., Ogilko S. A., Lavrukhin I. V., Belyanin K. O. Pendulum sclerometer for evaluating material corrosion resistance / Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48. N 11 – 12. P. 688 – 692. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84880585622&partnerID=40&md5=4283597f34cb92240e312677f587d532> (дата обращения: 22.03.2015).
5. Пат. 2539116 Российская Федерация, МПК G01N 3/46. Способ сравнительной оценки свойств материалов по отношению общей длины следа маятникового скрайбирования к длине лунки отскока / Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А., Безден Д. Н., Саблин П. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». — № 2013147567/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.
6. Пат. 2124715 Российская Федерация, МПК G01N 19/04. Способ оценки свойств инструментальных материалов / Мокрицкая Е. Б., Семашко Н. А., Рябцев Е. Э.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». — № 96107446/09; заявл. 16.04.96; опубл. 10.01.1999. Бюл. № 1.
7. Пат. 2138038 Российская Федерация, МПК G01N 19/04. Способ контроля физико-механических свойств изделий / Семашко Н. А., Мокрицкая Е. Б., Филоненко С. Ф., Мокрицкий Б. Я., Вахрушев О. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». — № 96107447/09; заявл. 16.04.96; опубл. 10.01.1999. Бюл. № 1.
8. Пустовалов Д. А., Мокрицкий Б. Я., Саблин П. А. Методики оценки свойств материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 6. С. 36 – 41.
9. Пустовалов Д. А., Мокрицкий Б. Я., Высоцкий В. В. Определение свойств поверхностных слоев материалов изделий по параметрам индентирования и акустической эмиссии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 6. С. 61 – 63.
10. Мокрицкий Б. Я., Панова Е. А., Козлова М. А., Саблин П. А. К вопросу об управлении работоспособностью металлорежущего инструмента: оптимизация свойств инструментальных материалов / Ученые записки КнАГТУ. 2014. № 2 – 1(18). С. 61 – 69.

REFERENCES

1. Mokritskii B. Y., Kirichek A. V., Shpilev A. M., Pustovalov D. A., Sablin P. A. Acoustic assessment of tool quality / Russian Engineering Research. 2013. Vol. 33. N 2. P. 74 – 78. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84874899411&partnerID=40&md5=bae6b05bd000d9d82c327cc775924af> (accessed 22.03.2015).
2. Mokritskii B. Ya. Tool Materials for Chemical Machine Building / Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49. N 9 – 10. P. 639 – 640. URL: <http://rd.springer.com/article/10.1007/s10556-014-9810-4/fulltext.html> (accessed 22.03.2015).
3. RF Pat. No. 2495412, MPK G01N 29/00. Sposob sravnitel'noi otsenki svoystv materialov [Method comparative evaluation of the properties of materials] / Pustovalov D. A., Mokritskii B. Ya., Petrov V. V., Ogilko S. A., Savinkovskii M. V., Somn V. I.; owner FGBOU VPO "Komsomolskii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet." — N 2012120101/28; appl. 15.05.2012; publ. 10.10.2013, Byull. N 28 [in Russian].
4. Pustovalov D. A., Mokritskii B. Ya., Ogilko S. A., Lavrukhin I. V., Belyanin K. O. Pendulum sclerometer for evaluating material corrosion resistance / Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48. N 11 – 12. P. 688 – 692. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84880585622&partnerID=40&md5=4283597f34cb92240e312677f587d532> (accessed 22.03.2015).
5. RF Pat. No. 2539116, MPK G01N 3/46. Sposob sravnitel'noi otsenki svoystv materialov po otnosheniyu obshchei dliny sleda mayatnikovogo skraibirovaniya k dlune lunki ot-skoka [A method of comparative evaluation of material properties in relation total track length to the length of the pendulum scribing wells rebound] / Mokritskii B. Ya., Pustovalov D. A., Bezden D. N., Sablin P. A.; owner FGBOU VPO "Komsomolskii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet." — N 2013147567/28; appl. 24.10.13; publ. 10.01.15. Byull. N 1 [in Russian].
6. RF Pat. No. 2124715, MPK G01N 19/04. Sposob otsenki svoystv instrumental'nykh materialov [A method of evaluating the properties of the tool materials] / Mokritskaya E. B., Semashko N. A., Ryabtsev E. E.; owner FGBOU VPO "Komsomolskii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet." — N 96107446/09; appl. 16.04.96; publ. 10.01.1999. Byull. N 1 [in Russian].
7. RF Pat. No. 2138038, MPK G01N 19/04. Sposob kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv izdelii [A method for controlling the physical and mechanical properties of the articles] / Semashko N. A., Mokritskaya E. B., Filonenko S. F., Mokritskii B. Ya., Vahrushev O. M.; owner FGBOU VPO "Komsomolskii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet." — N 96107447/09; appl. 16.04.96; publ. 10.01.1999. Byull. N 1 [in Russian].
8. Pustovalov D. A., Mokritskii B. Ya., Sablin P. A. Metodiki otsenki svoystv materialov [Methodology for assessing the properties of materials] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 6. P. 36 – 41 [in Russian].
9. Pustovalov D. A., Mokritskii B. Ya., Vysotskii V. V. Opredelenie svoystv poverkhnostnykh sloev materialov izdelii po parametram indentirovaniya i akusticheskoi emissii [Determination of the properties of the surface layer of materials from indentation and acoustic emission parameters] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 6. P. 61 – 63 [in Russian].
10. Mokritskii B. Ya., Panova E. A., Kozlova M. A., Sablin P. A. K voprosu ob upravlenii rabotosposobnost'yu metallorazhushchego instrumenta: optimizatsiya svoystv instrumental'nykh materialov [On the issue of management capacity for work of cutting tools: optimization of the properties of tool materials] / Uch. Zap. KnAGTU. 2014. N 2 – 1(18). P. 61 – 69.